

## **Acercamiento a la Capacidad de Utilización en Un Parque Nacional Marino en la Costa del Caribe Mexicano**

TORRUCO, D., M.A. GONZÁLEZ y J. AXIS-ARROYO

*Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida  
Carretera antigua a Progreso Km 6, C. P. 97310 A.P. 73 Cordemex  
Mérida; Yucatán México*

### **RESUMEN**

En el Mar Caribe en las últimas décadas, se ha despertado un fuerte interés por muchas disciplinas científicas en la capacidad de utilización, debido a las presiones que han causado el crecimiento demográfico y el uso de los recursos que esta área ofrece. En los ecosistemas marinos del Caribe Mexicano la explotación y utilización de los recursos mediante patrones no sustentables han contribuido a la destrucción y degradación de los habitats naturales, originando una enorme pérdida de la diversidad biológica, a pesar de que estas zonas costeras son un recurso extremadamente importante de empleo y obtención de divisas para la pesquería artesanal y el turismo basado en la naturaleza. El arribo turístico en estas zonas implica una importante entrada de divisas, esto origina que aproximadamente el 60% de la población económicamente activa se dedica al sector servicio. El desarrollo turístico del estado de Quintana Roo ha aumentado por el uso recreativo de sus áreas costeras para excursiones, buceo, navegación en botes, natación y pesca deportiva. Uno de los principales problemas de la reglamentación de utilización, es la determinación de la capacidad del medio para soportar los diferentes usos que se realizan en el área, es por ello que se han desarrollado una serie de poderosos esquemas teóricos aplicables al análisis racional de las observaciones empíricas hechas en el mar. Esto ha llevado a realizar análisis funcionales y dinámicos de las interrelaciones de los sistemas marinos con el medio externo e internos del mismo, en el presente se muestra como alternativa el uso de modelos basados en regresiones múltiples con diferentes atributos para tratar de dilucidar los márgenes de uso que sean más objetivos, para este ensayo se presenta como ejemplo el Parque Marino Costa Occidental de Islas Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc. Es probable que con esta metodología sea posible formular modelos predictivos capaces de anticipar los cambios en un ecosistema sujeto a presiones definidas.

**PALABRAS CLAVE:** Manejo, arrecifes de coral, regresión múltiple, método simplex, Caribe Mexicano

## **Approach to the Utilization Capacity in a Marine National Park on the Coast of the Mexican Caribbean**

### **ABSTRACT**

In the Caribbean Sea in the last decades, it have wakened up a strong interest for many scientific disciplines in the use capacity, due to the pressures that they have caused the population growth and the resources use that this area offers. In the ecosystems marines of the Mexican Caribbean the exploitation and the utilization of the resources by means of patterns not sustainably, they have contributed to the destruction and degradation of the natural habitats, originating an enormous loss of the biological diversity, in spite of the fact that this coastal zones is a resource extremely important of employment and obtaining of foreign currencies for the craft fishery and the tourism to support by the nature. The tourist arrival in this zones it implicate an important entrance of foreign currencies, also, for that time this meant that the 60% of the population economically active was devoted the service sector. The tourist development of the Quintana Roo state to have increased for the use of yours recreational coastal areas for trips, dive, sailing in boats, swimming and sport fishing. One of the principal problems of the regulation of utilization, it is the determination of the environmental capacity in order to support the several uses that are carried out in the area, it that they have developed a series of powerful theoretical applicable outlines to the rational analysis of the empiric observations made in the sea. This has carried to carry out functional and dynamic analysis of the interrelations of the marine systems with the enviroment external and interns of the same, presently pattern like alternative the use of models based an opinion on multiple regressions with several attributes in order to be about elucidate the margin of use that are more objectives, for this rehearsal the Parque Marino Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc is presented like example. It is probable that it with this methodology is possible formulate forecast model capables of advancing the change in an ecosystem subject to definite pressures.

**KEY WORDS:** Management, coral reef, multiple regression, simplex methods, Mexican Caribbean

### **INTRODUCCION**

Uno de los grandes retos de la ecología tropical consiste en descubrir formas de utilización del ecosistema tropical natural sin provocar una perturbación continúa y de gran magnitud. Es evidente que cualquier política de gestión y administración ambiental duradera dependerá de la estrecha interrelación de sus factores principales: la base físico- ecológica del recurso, las consideraciones

económicas incluyendo los valores no monetarios (estéticos- visuales) y las estructuras socio- institucionales que en última instancia dictan la aceptación ó el rechazo de una política de desarrollo y administración. Desgraciadamente falta el conocimiento descriptivo fundamental en la mayor parte de los sistemas naturales del país, es por ello la necesidad de reunir información ecológica básica que permita proyectar tipos de esquemas de utilización que sean factibles de ser aplicables.

El aprovechamiento de cualquier área genera una perturbación que afecta el equilibrio de los procesos ecológicos del sistema, que puede ser medible en espacio y tiempo. Esta perturbación es un hecho probabilístico con diferentes niveles en donde su efecto puede ser total o parcial; sin embargo, la suma de las perturbaciones de cada actividad de uso generadas en forma individual más las interacciones que pudieran existir entre ellas sería el efecto directo y la interacción de esta con otras actividades sería el efecto indirecto. Ambos efectos impactan el sistema en mayor o menor grado. La expresión de perturbación estaría dada por:

$$0 \leq Pe \leq 1$$

$$Pe = \sum_{j=1}^N (Ed + Ei)$$

Donde:

Pe = Perturbación

Ed = Efecto directo de cada actividad

Ei = Efecto indirecto de cada actividad

En consecuencia, el cálculo de los efectos directos de una actividad sobre el sistema no es un factor individual, por lo que es necesario el uso de análisis multicriterios. Además, al considerar la perturbación como un proceso probabilístico, se deben establecer los causales de este proceso, cada causal equivaldrá a una de las actividades que conforman el proceso de aprovechamiento, a la vez que la perturbación será considerada como resultante; en un análisis multicriterio las causales son consideradas como variables independientes (en modelos de regresiones) o como variables causales (en modelos de causalidad) y la resultante como variable dependiente o como variable de respuesta.

Es posible combinar ambos modelos para estimar, los efectos directos mediante modelos de regresión múltiple y los efectos indirectos mediante cualquier modelo causal que considere la estructura de las relaciones entre las variables independientes y la variable de respuesta. El modelo de regresión múltiple cuantifica la influencia del total de las variables y podría ser un indicador de la confiabilidad de la relación entre las variables independientes y la

dependiente. La regresión múltiple, calcula también la importancia relativa de cada una de las variables independientes en los valores de la variable dependiente, mediante los coeficientes parciales de regresión estandarizados (CPR). Un CPR con un alto valor absoluto indica un alto grado de influencia de la variable independiente en la dependiente, por lo que el CPR puede ser considerado como una medida del efecto directo de una variable.

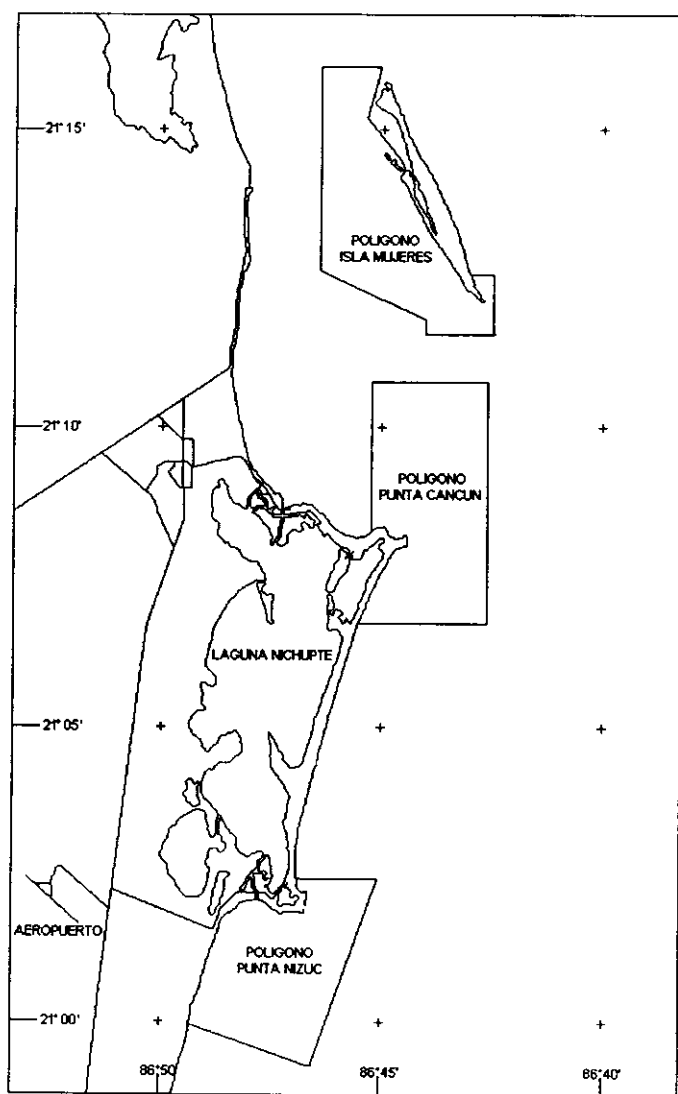
Sin embargo, la medida de perturbación en un ecosistema forzosamente debiera de ser estimada a partir de un parámetro de control que sea sensible a los efectos generados por el aprovechamiento y fácilmente cuantificable. En nuestro caso hemos utilizado la riqueza de especies. La perturbación del proceso de aprovechamiento se determinará por la relación de la actividad ejercida en un lapso de tiempo y la variación en el parámetro de control. Consecuentemente la capacidad de uso del ecosistema estará determinada por la perturbación generada por alguna actividad y por la capacidad de recuperación del sistema en el tiempo, hemos considerado que no es recomendable que la perturbación exceda el 20% de la capacidad de recuperación del sistema, es decir: si nuestro parámetro de control son las especies sensibles al proceso y el aprovechamiento del sistema en un año daña al 20% de la población, esta deberá de tener la capacidad de duplicarse en un máximo de 5 años.

En el caso particular del Parque Marino Costa occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, esta sujeto a un aprovechamiento principalmente turístico, en donde las actividades generadoras de perturbación son diversas y con particularidades importantes: una de ellas es su fragmentación en tres polígonos de áreas semejantes (Figura 1), con actividades de utilización diferentes en magnitud y frecuencia, sin embargo en este trabajo, se evalúa exclusivamente su capacidad general de uso.

#### **MATERIAL Y METODOS**

El parque Marino Costa occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, se localiza en la parte norte de la Península de Yucatán. Presenta una configuración de tres polígonos separados con las siguientes áreas: Polígono de Isla Mujeres -2795 has, Polígono de Punta Cancún -3301 has y Polígono de Punta Nizuc -2576 has (Figura 1).

Dadas sus características arrecifales se considera una zona de alta diversidad de hábitats con gran diferenciación en cuanto a sus especies presentes y a su importancia relativa. No obstante, no es factible considerar una especie como parámetro de control, sin embargo la diversidad de las especies si se considera un buen parámetro de control que estandariza directamente las diferencias entre las condiciones de cada hábitat y considera indirectamente la estructura del paisaje del sistema.



**Figura 1.** El parque Marino Costa occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, se localiza en la parte norte de la Península de Yucatán. Presenta una configuración de tres polígonos separados con las siguientes áreas: Polígono de Isla Mujeres -2795 has, Polígono de Punta Cancún -3301 has y Polígono de Punta Nizuc -2576 has.

Los modelos de regresión describen un complejo arreglo potencial de variables que pueden cooperar (Austin 1972, Jeffers 1978). En este caso, se utilizó una regresión múltiple para evaluar las interacciones de cada variable con la riqueza específica, identificar su influencia de manera directa y calcular sus CPR (Clark 1984), ya que el modelo de regresión múltiple expresa una transformación lógica de probabilidad de sucesos, como una función de una combinación lineal de parámetros desconocidos, que se arreglan como una serie jerárquica de hipótesis (Goodall 1972, Davis 1973).

El procedimiento de las regresiones múltiples, dan lugar a una ecuación de regresión cuya forma es:

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$$

En donde:

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  representan las variables independientes.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$  representan los pesos beta (CPR) de Y sobre las variables independientes, las cuales manifiestan el cambio promedio de Y cuando  $X_1$  aumenta una unidad, permaneciendo  $X_2$  inmutable.

a es la constante de regresión.

$\epsilon$  es el error aleatorio el cual sigue una distribución normal e independiente con una media=0 y una varianza  $\sigma^2$ .

Con esta herramienta se identificó la magnitud de las interrelaciones de los variables con la riqueza específica (Watts 1968) y se utilizó como criterio para seleccionar las variables que se someterían al proceso de optimización.

En el proceso de optimización la existencia de  $n$  actividades de aprovechamiento reduce la diversidad a un valor  $z$ . Se parte de una función de condiciones actuales en donde la optimización se logra cuando  $z$  tenga un valor máximo lo que será considerado el óptimo teórico generado por la relación de las  $n$  actividades de aprovechamiento cuando estas tengan los valores mínimos posibles.

En consecuencia, la función objetivo maximizada de  $z$  esta dada por la ecuación:

$$\text{maximización de } z = M + NU + S + H$$

Donde:

z- Riqueza específica

M- Número de embarcaciones

NU- Número de usuarios

S- Solidos suspendidos totales.

H- Hidrocarburos totales.

Esta función se obtuvo bajo las siguientes consideraciones: el número total

de embarcaciones es el que trabajan en el parque, es conveniente mencionar que las embarcaciones pueden ser de diferentes capacidades, que van desde una lancha de pesca o una moto acuática con 2 o 3 individuos hasta las que llevan 60-80 pasajeros. Así mismo, hay embarcaciones que operan en los tres polígonos, otros en dos y algunas en sólo uno. Lo anterior es aplicable también en las empresas. Es importante considerar que el número de usuarios no es un reflejo de la actividad desarrollada, ya que se presentan diferentes actividades: pesca deportiva, buceo (libre y autónomo), excursiones, submarinos turísticos, entre otros (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores iniciales de las variables. Se presentan en Total y para cada Polígono del PMN

Atributo	Localidades			
	Total	Cancún	Nizuc	I. Mujeres
Número de especies	172	139	95	138
Número de embarcaciones	627	298	390	389
Número de usuarios	6558	3228	1515	5746
Sólidos suspendidos totales	6.58	6.82	4.48	11.26
Hydrocarburos	51.76	16.04	28.04	181.26

La función objetivo estará condicionada por la relación existente entre las actividades de aprovechamiento y la riqueza específica (z), de manera general para los tres polígonos. En la ponderación de esta función objetivo se establecieron los siguientes 4 escenarios:

$$M+NU+S+H= 90\% \text{ de } z$$

$$M+NU+S+H=80\% \text{ de } z$$

$$M+NU+S+H= 110\% \text{ de } z$$

$$M+NU+S+H= 120\% \text{ de } z$$

Lo que implica que un aumento o disminución de la riqueza específica en un 10 o 20% será considerado lo máximo permitido a nivel específico (z) para el sistema, con la restricción condicionante de que todas las variables están restringidas a valores no negativos. El método en este acercamiento fue el simplex por reducción de Gauss, para obtener estimados de la capacidad de utilización de estas áreas, en donde cada escenario debe proporcionar diferentes esquemas de utilización.

# RESULTADOS

La relación e interacción de cada variable utilizada está esquematizada en la Tabla 2, la cual presenta las magnitudes de los índices de correlación individuales (Gray 1981). Es evidente que de manera lineal existe fuerte influencia del número de usuarios en la expresión de riqueza de especies. Así como entre el número de empresas, las embarcaciones y el número de usuarios.

**Tabla 2.** Semimatriz de coeficientes de regresión de las variables involucradas.

	A	B	C	D	E	F
A Número de especies	1					
B Hidrocarburos	-1.0*	1				
C Número de usuarios	0.8	-0.76	1			
D Número de embarcaciones menores	0.94	-0.92	0.95	1		
E Número de embarcaciones mayores	-0.70	0.74	-0.12	-0.42	1	
F Número de empresas	0.87	-0.83	0.99*	0.98*	-0.24	1

La ecuación de regresión múltiple obtenida fue:

$$Y = 73.8 + 0.013 M + 1.672 N + (-0.008 NU) + (-1.48 S) + (-0.194 H) + 3.8E-14$$

Mediante el método simplex de optimización, las constantes de optimización dan la siguiente ecuación objetivo:

$$z = M(0.0924097) + NU(0.007678) + S(14.00048) + H(-0.549008)$$

Los diferentes escenarios proporcionan las siguientes ecuaciones:

Con un incremento del 10 % de la riqueza específica ( $z_1 = z + 10\%$  de  $z$ )

$$z_1 = M(0.0924097) + NU(0.007678) + S(14.00048) + H(-0.549008)$$

Con un incremento del 20 % de la riqueza específica ( $z_2 = z + 20\%$  de  $z$ )

$$z_2 = M(0.0924097) + NU(0.007678) + S(14.00048) + H(-0.549008)$$

Con una disminución del 10% de la riqueza específica ( $z_3 = z - 10\%$  de  $z$ )

$$z_3 = M(0.0924097) + NU(0.007678) + S(14.00048) + H(-0.549008)$$

Con una disminución del 20% de la riqueza específica ( $z_4 = z - 20\%$  de  $z$ )

$$z_4 = M(0.0924097) + NU(0.007678) + S(14.00048) + H(-0.549008)$$



## DISCUSSION

La ecuación de regresión múltiple define relaciones negativas para las variables de número de usuarios, sedimentación e hidrocarburos, con un coeficiente de determinación bastante alto ( $R^2 = 0.98$ ). La sedimentación tiene un efecto directo sobre la penetración de la luz, ya que origina un descenso en el crecimiento y en la tasa de supervivencia coralina debido a la luz disponible para sus zooxanthelas simbióticas y a que cubre el tejido coralino. Sin embargo, la tolerancia del coral a la alta sedimentación varía en cada especie, algunas son poco resistentes a los efectos aún con baja sedimentación, es por ello que la sensibilidad de estos aspectos depende de la habilidad de limpiar el sedimento, del tipo de sedimento involucrado, de la morfología del cáliz coralino, de la forma de la colonia, así como de su orientación y crecimiento (Rogers 1990, Stafford-Smith 1993, Mills y Sebens 1997). Por lo anterior, se utilizaron además de los datos de corales, otros grupos taxonómicos que no son tan sensibles a la sedimentación como es el caso de los moluscos y equinodermos, entre otros. De ahí que los resultados pueden estar sesgados, por lo que se propone derivar de esta ecuación general ecuaciones parciales para cada grupo taxonómico, además de ponderar el peso que cada grupo aporta a la conectividad ecológica del paisaje. Los modelos subsecuentes deberán involucrar además de la presencia, medidas más precisas como es la relación abundancia (cobertura o biomasa) y el área definida.

Muchos de los conceptos demográficos familiares no se pueden aplicar a estudios de organismos clonales como los corales, ya que en estas teorías convencionales no se consideran las consecuencias ecológicas y evolutivas de los procesos modulares como son: crecimiento indeterminado, mortalidad parcial, fisión, fusión, translocación de materia, entre otros (Tomascik 1990, Bilger y Atkinson 1995). Sin embargo, es de vital importancia en cualquier teoría la desaparición de una especie dentro de un ecosistema, de acuerdo a la ecuación general o función objetivo, si aumentamos un 20% de embarcaciones, sedimento disuelto, usuarios e hidrocarburos, la riqueza se ve disminuida en 13 especies. Con las ecuaciones de optimización, los resultados se corroboran, es evidente que esta pérdida en la riqueza específica debe ser fundamental para un administrador de los recursos y un argumento bastante sólido para definir el desarrollo que se espera del parque.

El poder predictivo de éste modelo es hasta ahora parcial, ya que se requiere de un análisis detallado de los residuos, que puede mejorar sustancialmente su consolidación. Es necesario que estos acercamientos incluyan el marco ambiental, para discriminar o concatenar efectos de los mismos con las variables causales y de ellos con la variable de respuesta.

En este caso, la comunidad arrecifal puede presentar ecuaciones que determinen bajas predicciones, debido a que no se establece una relación entre las

abundancias de sus componentes, ni las dependencias de la variable de respuesta con los factores ambientales que pudieran ser de gran importancia. Un elemento que fortalece este procedimiento es el bajo valor del error estandar obtenido, lo cual permite asegurar con precisión la magnitud de los efectos independientes de los coeficientes parciales. Uno de los aspectos importantes a describir en futuros trabajos, son las interacciones entre los grupos bentónicos, los cuales podrían evidenciar aspectos de transferencia de biomasa y energía entre los diferentes gremios jerárgicos de la comunidad arrecifal, así como de contaminación (Hughes 1984).

Un análisis completo proporcionaría evidencias de los procesos de deterioro del habitat, además de la depredación y competencia que ocurren al presentarse la utilización de recursos comunes, entre ellos el espacio y el alimento. Será necesarias regresiones directas de la biomasa bentica, con los factores ambientales y los micronutrientes. No obstante, ha sido posible evaluar hasta ahora que las tasas de cambio de parámetros importantes como el oxígeno, temperatura y fosforo, entre la columna de agua y los sedimentos son muy fuertes debido al influjo de la corrientes prevalescentes y de la escasa profundidad.

Los resultados obtenidos en este estudio fueron estadísticamente muy significativos, sin embargo una ecuación de regresión múltiple por si sola puede ser mala predictora, si el modelo de acción verdadero de las variables relevantes es marcadamente no lineal. Así mismo en algunos casos, las variables independientes se relacionan inversamente unas con otras, lo que también sugiere una concepción no realista para describir un sistema biológico complejo (Jones 1961). Sin embargo, la dimensión utilizada en este trabajo, incluye muchos fenómenos que tienen una tasa máxima de acción la cual no pueden excederse (Long 1983). En donde los diversos parámetros suelen mostrar una correlación entre sí, debido a su dependencia común a un tercero (Pope 1979). El método simplex corrobora los resultados obtenidos con la regresión múltiple, lo cual es un indicio de las causalidades encontradas.

#### LITERATURA CITADA

- Austin, M.P. 1972. Models and analysis of descriptive vegetation data. In: Jeffers, J.N.R. (ed.) *Mathematical models in Ecology*. Blackwell Scientific Publications.
- Bilger, R.W. and M.J. Atkinson. 1995. Effects of mass loading on mass transfer rates to a coral reef community. *Limnol. & Oceanogr.* 40(2):279-289.
- Clark, C.W. 1984. Strategies for multispecies management; Objectives and Constraints. In: May, R.M. (ed.) *Exploitation of marine communities*.

## Proceedings of the 51st Gulf and Caribbean Fisheries Institute

- Report of the Dahlem Workshop on exploitation of marine communities. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Davies, R.G. 1971. *Computer programming in quantitative biology*. Academic Press, London.
- Goodall, W.D. 1972. Building and testing ecosystem models. In: Jeffers, J.N.R. (ed.) *Mathematical models in Ecology*. Blackwell Scientific Publications.
- Gray, J.S. 1981 *The ecology of marine sediments. An introduction to the structure and function of benthic communities*. Cambridge Studies in Modern Biology 2. Cambridge University Press.
- Hughes, R.G. 1984. A model of the structure and dynamics of benthic marine invertebrate communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **15**:1-11.
- Jeffers J.N.R. 1978. *An introduction systems analysis: With ecological applications*. A series of student texts in contemporary biology. Edwards Arnold Publ.
- Jones, M.L. 1961. A quantitative evaluation of the benthic fauna off Point Richmond, California. *University of California Publication in zoölogy*. University of California Press. 67(3):219-320. Berkeley and Los Angeles.
- Long, E.R. 1983. A multidisciplinary approach to assessing pollution in coastal waters. 3/ *Symposium on coastal and ocean managements*. ASCE/Sn. Diego, California.
- Mills, M.M. and K.P. Sebens. 1997. Particle ingestion efficiency of the coral *Siderastrea siderea* and *Agaricia agaricites*: Effects of flow speed and sediment loads. *Proc. 8th. Int. Coral Reef Symp.* **2**:1059-1064
- Pope, J.G. 1979. Population dynamics and managements: currents status and future trends. *Inves. Pesqu.* **43**(1):199- 221.
- Rogers, C.S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **62**:185-202.
- Stafford-Smith, M.G. 1993. Sediment rejection efficiency of 22 species of Australian scleractinian corals. *Mar. Biol.* **115**:229-243.
- Tomascik, T. 1990. Growth rates of the two morphotypes of *Montastrea annularis* along a eutrophication gradient, Barbados, W.I. *Mar. Pollut. Bull.* **21**:376-381
- Watt, K.E.F. 1968. *Ecology and resource management. A quantitative approach*. McGraw-Hill Book Company, London.